

# CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESEMPENHO DOS ELETRODOS NOS FORNOS ELÉTRICOS A ARCO\*

*Paulo von Krüger<sup>1</sup>  
Gustavo von Krüger<sup>2</sup>  
Níveo Roberto Campos e Souza<sup>3</sup>*

## Resumo

O desempenho dos eletrodos nos fornos elétricos a arco, depende, essencialmente, de três grupos de fatores distintos. O primeiro é a sua qualidade intrínseca, expressa em termos de resistividade, densidade, porosidade etc., cujos valores são dependentes dos materiais e procedimentos empregados na sua fabricação. O segundo se refere aos parâmetros/procedimentos operacionais do forno elétrico, que são função do produto, da carga, dos recursos do forno, dos resultados objetivados etc. O terceiro é relacionado aos procedimentos praticados no manuseio, montagem, armazenagem etc., dos eletrodos, desde a sua recepção na planta, até seu consumo. Este trabalho se propõe a revisar e comentar alguns dos aspectos relevantes de cada um daqueles fatores, com ênfase no terceiro, assim como identificar o modo como cada ação influi no desempenho dos eletrodos.

**Palavras-chave:** Eletrodos; Pinos de conexão; Forno elétrico a arco.

## RELEVANT FEATURES ON ELECTRODES PERFORMANCE IN EAF

### Abstract

The performance of electrodes in electric arc furnaces depends on three different kind of factors. The first one is its intrinsic quality, referred as resistivity, density, porosity etc., whose values depend on the materials and procedures employed on its manufacturing. The second is referred to EAF parameters/operational procedures, that are referred to the product, charge and furnace characteristics, the operations goals etc. The third one is related to the handling, assembling storage of electrodes during its lifetime in the plant. This work intends to revise and comment some of the relevant features of each of those factors as well as identify the influence of each one on the electrodes performance, emphasizing the third factor.

**Keywords:** Electrodes; Connection nipples; Electric arc furnace.

<sup>1</sup> Engenheiro de Minas e Metalurgia, MSc, Diretor Técnico da ACK Representantes Ltda.; Professor aposentado da Escola de Minas, UFOP, Membro da ABM, TMS, AISTECH, ISIJ, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Administrador Diretor Executivo, ACK Representantes Ltda., Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Assistente Técnico, ACK Representantes Ltda., Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Como é sabido, a parcela do custo correspondente aos eletrodos, na operação de fornos elétricos, está entre as mais significativas. Deste modo, é óbvio que o aumento ou redução do seu consumo específico vai influir negativa ou positivamente, no custo do produto.

Há que se considerar, no entanto, que a consideração exclusiva do preço deste insumo, é por demais simplista e só traduz parte da real influência do seu desempenho, nos resultados da instalação.

Com efeito, sendo a recomposição das colunas, um processo descontínuo, cada vez que ela ocorre, é preciso parar o forno para fazê-la. Assim sendo, quanto maior a frequência, e duração, deste processo de recomposição, maior será o tempo parado, assim como a perda de temperatura. Isto, evidentemente, aumenta tanto o tempo de processo, quanto o consumo de energia, levando a perdas de produtividade e aumento de custo.

Considerando que dois dos principais objetivos são a minimização dos custos e a otimização da produtividade, tanto o operador da planta, quanto o fabricante de eletrodos estão permanentemente objetivando, a melhor condição operacional e a melhor qualidade do insumo, respectivamente.

Cada uma destas condições será analisada, sob o enfoque do eletrodo.

## 2 QUALIDADE DO ELETRODO

Em função da sua qualidade, os eletrodos são classificados de acordo com a corrente de operação, considerada compatível com um desempenho satisfatório. De acordo com este critério, os eletrodos são classificados como de Potência regular (RP), Alta Potência (HP), Super Alta Potência (SHP) e Ultra Alta Potência (UHP). Há outras denominações de classes, mas dentro da mesma filosofia.

Há que se dizer que esta indicação de "corrente compatível" e "consumo satisfatório" é um tanto fluida e serve apenas como base de referência. As condições realmente desejáveis dependem de muitos outros fatores.

No quadro 1 são mostradas os principais parâmetros de qualidade do produto "eletrodo" e, na sequência, é comentada a influência de cada um no seu desempenho.

Quadro 1 - Propriedades físicas dos eletrodos

Propriedade	Unidade	Faixa típica*
Densidade aparente	g/cm <sup>3</sup>	1,55/1,78 (Eletrodos) 1,68/1,85 (Pinos)
Resistividade	μΩm	4,5/9,5 (Eletrodos) 3,0/5,5 (Pinos)
Resistência à flexão	MPa	7,5/15,0 (Eletrodos) 14,0/22,0 (Pinos)
Módulo de elasticidade	GPa	7,0/13,5 (Eletrodos) 10,0/22,0 (Pinos)
Coeficiente de expansão térmica	10 <sup>-6</sup> x1/K	4,0/17,0 (Eletrodos) 2,0/9,0 (Pinos)
Porosidade	%	21,0/30,0 (Eletrodos) 16,0/24,0 (Pinos)

Inclui todas as categorias (RP, HP, SHP, UHP) e diâmetros

Valores mais altos da **densidade aparente** correspondem a um maior grau de grafitização, mas, por outro lado, levam a um aumento do coeficiente de expansão térmica.

O valor da **resistividade elétrica** indica a qualidade e a classe dos eletrodos de grafite. Resistividades baixas significam menor consumo de energia, menores perdas associadas à oxidação do eletrodo e possibilidade de usar correntes mais altas.

**Resistências à flexão** maiores reduzem as possibilidades de ocorrência de fraturas e lascamentos dos eletrodos, decorrentes da ação de forças sobre a coluna.

Maiores **resistências à tração** nos pinos levam à redução da frequência de quebras.

Um baixo **coeficiente de expansão térmica** resulta numa melhor resistência ao choque térmico. Além do valor do coeficiente em si, é importante a compatibilidade entre os valores do eletrodo e o do pino, uma vez que eles vão trabalhar acoplados.

O valor da **porosidade** vai determinar a secção do condutor e a superfície exposta ao ambiente, influenciando na resistência elétrica e na taxa de oxidação.

Naturalmente, todos estes parâmetros são de responsabilidade do fabricante e a sua ação no sentido de otimizá-los ocorre em cada etapa do processo de fabricação. A Figura 1 mostra as etapas típicas da fabricação de eletrodos e pinos.

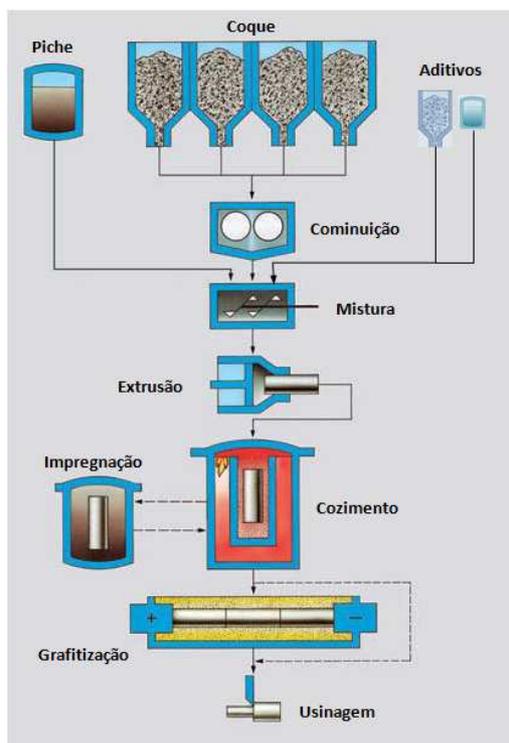


Figura 1 - Etapas na fabricação de eletrodos e pinos

As ações no sentido de melhorar a qualidade dos eletrodos se encontram em cada etapa do processo. Além disto a intensidade e qualidade destas ações variam em função da classe do eletrodo e do tipo de produto (eletrodo ou pino).

Do lado dos materiais de entrada, pode-se destacar o desenvolvimento do coque agulha (needle coke), dos aditivos e de piches para impregnação.

Com respeito aos aditivos, cada fabricante tem o seu desenvolvimento próprio. Os resultados alcançados com o seu emprego são, basicamente, a redução do coeficiente de expansão térmica, a redução da porosidade (associada à impregnação) e melhora das propriedades mecânicas.

Nas formulações contempla-se a redução dos vazios e do consumo de ligante pelo correto ajuste da distribuição granulométrica.

No cozimento e grafitização são ajustadas os tempos e as curvas de aquecimento e resfriamento, que, além das demais propriedades, têm influência marcante na estrutura interna dos eletrodos e pinos.

Pelas suas próprias características, o processo de fabricação é feito peça a peça e o controle de qualidade também é conduzido do mesmo modo. Cada peça é inspecionada e tem seus parâmetros de qualidade medidos individualmente.

Com estas características, a possibilidade de expedição de peças não conformes é reduzida a valores próximos de zero. Naturalmente não se pretende afirmar que aquilo é impossível, mas que a probabilidade é baixa.

Para efeito de controle, por parte dos usuários, os fabricantes apõem em cada peça (eletrodos e pinos), etiquetas que dão as suas principais características, como que um "mini-certificado".

### 3 PROCEDIMENTOS NO USO

Estes podem ser divididos em duas categorias, uma referida às condições de operação do forno e a outra concernente ao manuseio dos eletrodos e colunas.

#### 3.1 Procedimentos Operacionais

Os procedimentos operacionais são aqueles que caracterizam a operação do forno. Do ponto de vista da sua relevância no desempenho dos eletrodos, pode-se relacionar a corrente, a tensão eletrodo-banho, o tempo de forno ligado (power on), o tempo total de ciclo (tap to tap), a vazão de oxigênio e o posicionamento das lanças, a refrigeração dos eletrodos etc.

Cada um destes parâmetros tem, em maior ou menor extensão, influência no consumo de eletrodos. Naturalmente o valor deste consumo está relacionado tanto pelas condições de operação, quanto pelas propriedades dos eletrodos.

Referindo apenas aos procedimentos operacionais, ou seja, considerando que as características intrínsecas dos eletrodos permanecem invariáveis, pode-se definir o modo como cada um daqueles parâmetros influi no consumo de eletrodos.

O aumento da **intensidade da corrente** aumenta o comprimento da zona quente do eletrodo, passível de oxidação (coluna vermelha) e aumenta a velocidade de sublimação na ponta da coluna. Por outro lado, ela tende a aumentar a velocidade de fusão e aquecimento, reduzindo tanto o tempo total, quanto o de forno ligado. Assim, enquanto os dois primeiros fatores implicam num aumento do consumo, os dois últimos levam à sua redução.

Com respeito a isto, há uma indicação dos fabricantes quanto à capacidade de condução de corrente dos eletrodos, em função da sua classe e diâmetro.

O gráfico da Figura 2 mostra as faixas de utilização de cada classe e, a título de ilustração, foram plotadas e comentadas algumas condições.

Os exemplos contemplam casos de eletrodos de 350mm (14"), 450mm(18") e 550mm(22"). Supõe-se que estes sejam os diâmetros do projeto.

No primeiro caso, observa-se que um eletrodo HP atende. A opção por um RP, de menor custo unitário, implica num consumo maior, enquanto um SHP leva a um consumo menor, porém com um material mais caro.

O segundo caso sugere uma condição onde houve um repotenciamento, sem alterar

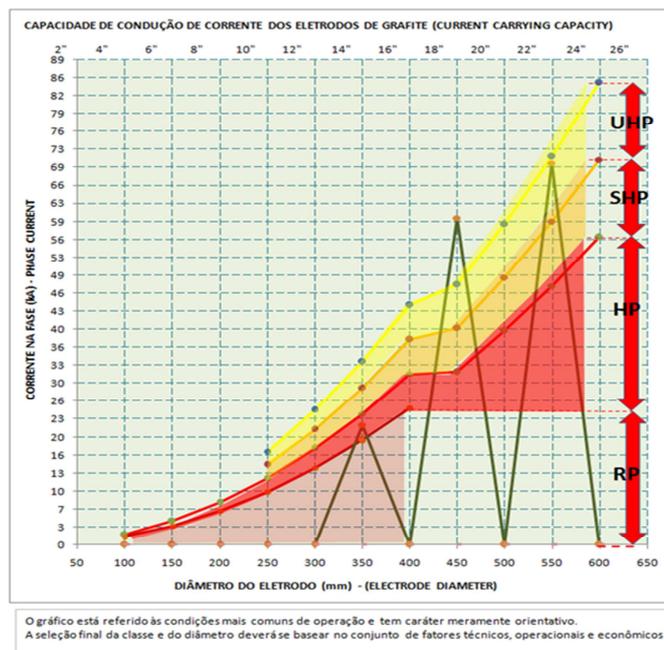


Figura 2 - Capacidade de condução de corrente , por classe e diâmetro

o projeto. O consumo é, naturalmente maior, mas isto pode ter sido compensado pelo aumento da produtividade da instalação.

No terceiro caso é mostrado um eletrodo próximo ao limite superior recomendado. Esta poderia ser considerada como uma condição otimizada.

A maior **tensão eletrodo-banho**, como ocorre nas operações com arco longo, diminuem a área de contato arco-eletrodo, reduzindo a erosão e sublimação.

Além da tensão e da corrente, já mencionados, que influenciaram na sua duração, os **tempos de forno ligado** e também o **tempo total**, dependem de vários outros fatores, como as características da carga e do produto, paradas sazonais etc.

O uso de **oxigênio** visa o aumento da produtividade e a redução do consumo específico de energia elétrica. Naturalmente isto cria um ambiente mais oxidado, favorecendo a reação do carbono do eletrodo. Isto é particularmente agressivo se, em função da posição da lança, o fluxo do gás impactar a coluna.

Finalmente, a **refrigeração das colunas** é um recurso destinado especificamente a reduzir o consumo de eletrodos, não sendo, a rigor, um procedimento operacional.

### 3.2 Manuseio dos Eletrodos

Neste item, são considerados todos os procedimentos referentes à recepção, estocagem, manuseio, montagem e manutenção dos eletrodos e respectivas colunas.

Normalmente os procedimentos recomendados emanam de recomendações dos fabricantes e versam sobre cuidados no **manuseio**, condições de **armazenagem** e instruções com respeito à **montagem** das colunas e o seu **monitoramento** durante o uso.

No que diz respeito ao manuseio e estocagem, a recomendação é, principalmente evitar quedas e impactos.

No que se refere ao armazenamento, apesar de haver uma recomendação para manter as peças ao abrigo das intempéries, pode-se dizer que elas são suficientemente resistentes à ação do tempo, para serem estocadas em áreas

abertas. A recomendação principal é a de manter as proteções dos bocais e pinos preservadas até o momento de uso.

Os dois últimos itens, ou seja, a montagem das colunas e o seu monitoramento ao longo do uso são, de longe, os mais críticos.

Com efeito, as junções entre as peças, na montagem da coluna, são pontos de descontinuidade e, portanto, os mais frágeis e passíveis de rompimento. Assim sendo, esta emenda deve ser a mais perfeita possível e, para tal, os fornecedores fornecem instruções detalhadas de como proceder.

Para melhor ilustrar, a Figura 3 mostra a sequência de procedimentos para se fazer a união das peças constituintes da coluna de eletrodos.

Esta figura é transcrita de um banner fornecido por um fornecedor russo e pretende mostrar que o procedimento não é complicado, mas, sem dúvida, é essencial, como se verá mais adiante.

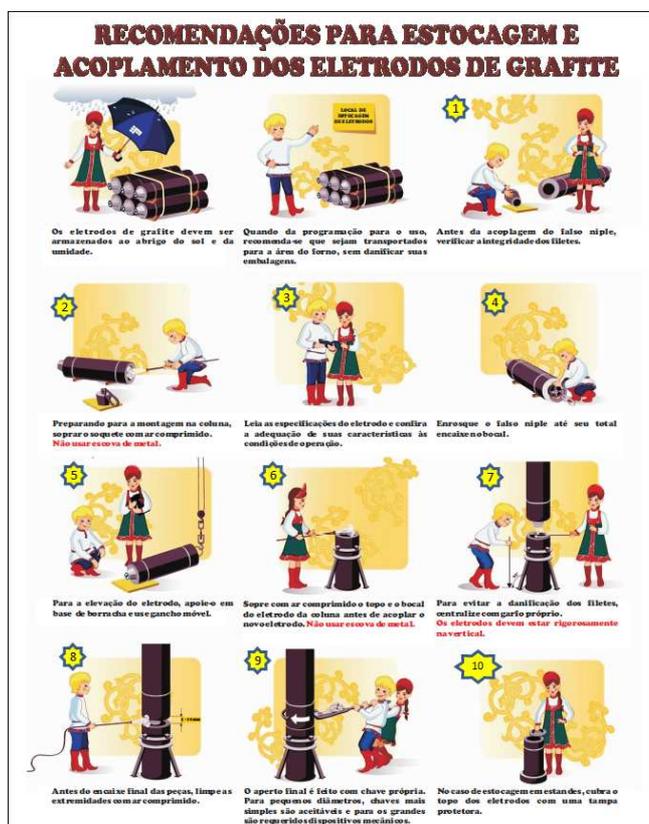


Figura 3 - Etapas do procedimento de montagem da coluna eletródica

Para maior clareza, são descritas as etapas numeradas da figura.

O **item 1** se refere à inspeção da peça que vai ser acoplada ao eletrodo para movimentá-la (falso nipple), para verificar a integridade dos filetes. Isto é particularmente importante quando esta peça é metálica.

O **item 2** preconiza que o bocal do eletrodo deve ser completamente limpo antes do acoplamento do falso nipple, para evitar a sua danificação.

O acoplamento, mostrado no **item 4** deve ser feito cuidadosa e completamente.

O **item 5** indica a necessidade de uma base macia para apoiar o pino, quando do içamento da peça, para não danificar a sua rosca.

O **item 6** mostra a limpeza do bocal que vai receber o pino da nova peça, sempre com o objetivo de preservar os filetes e assegurar uma boa junção.

O espaçador mostrado no **item 7**, visa assegurar o paralelismo das faces das duas peças e evitar que o pino da peça descendente esbarre nos filetes da rosca da peça inferior.

O **item 8** mostra a necessidade de uma última limpeza das faces das peças antes da junção, para evitar que algum resíduo prejudique o contato.

O aperto final, mostrado no **item 9**, é feito com ferramentas apropriadas e o torque (fornecido pelo fabricante), deve ter um valor que assegure uma junção firme e estável, sem criar tensões elevadas que, com a dilatação, levem ao colapso da junta.

A última recomendação da sequência, mostrada no item 10, é a proteção do bocal exposto, da peça superior, com uma tampa apropriada.

A observação destes procedimentos assegura a integridade das colunas durante a operação, cujo consumo se resumirá ao desgaste normal, inerente ao processo.

#### 4 DESEMPENHO DOS ELETRODOS - CONSUMOS

Como já mencionado, o desempenho dos eletrodos é medido em termos de consumo.

Estes são de dois tipos.

O primeiro, decorrente do processo, é o consumo contínuo, onde o eletrodo vai se consumindo gradualmente, por oxidação lateral e sublimação e erosão da ponta.

O segundo, descontínuo, se dá na forma de quebras da coluna e perdas de pontas.

As causas são variáveis e serão comentadas mais adiante.

##### 4.1 Consumo Contínuo

A Figura 4 mostra os mecanismos do consumo contínuo.

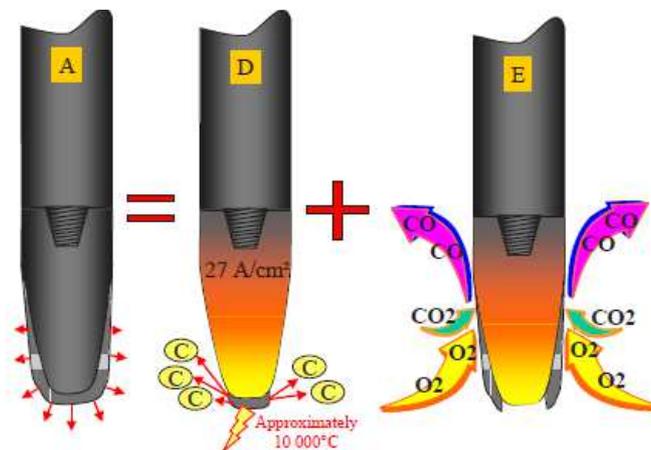


Figura 4 - Mecanismos do consumo contínuo de eletrodos - oxidação e sublimação

Sendo previsível e baseado em princípios bem definidos, é possível avaliar, com um grau de aproximação satisfatório, os valores deste consumo.

Existem, na literatura especializada, várias propostas para esta avaliação.

Nestas, são desenvolvidas expressões envolvendo as diversas variáveis de processo e outras relacionadas à qualidade do eletrodo.

Dentre estas algumas são difíceis de serem traduzidas em expressões matemáticas representativas. O artifício que é usado para estas é transformá-las em constantes, a partir de tratamento estatístico de informações de processo.

Tal artifício permite chegar a valores de consumo que representam um universo de fornos, mas não reflete, necessariamente, os resultados de unidades individuais.

Para se determinar um modelo que represente uma operação/forno específica, é necessário determinar o valor das constantes válidas para aquela unidade.

No caso de avaliação de uma unidade qualquer, seriam coletados os valores daquelas variáveis constando na expressão, além de o consumo de eletrodos num período que permitisse gerar uma amostra significativa, que permitisse calcular os novos valores.

As novas constantes passam a ser a referência, para avaliar tanto a qualidade de eletrodos, como a influência de parâmetros de operação no seu desempenho.

Como mencionado, há várias maneiras para calcular os consumos de eletrodos, propostos por vários autores (Jaccard, Kuhlow, Bowman etc.).

A sua análise foge do escopo deste trabalho.

#### 4.1 Consumo Descontínuo

Este tipo de consumo, pontual e imprevisível pode ser resultante de três causas.

Uma primeira, altamente improvável, pelas razões apontadas anteriormente, seria a não conformidade do eletrodo.

Uma segunda seria a quebra acidental por solicitação mecânica, como queda de sucata, material isolante na carga, erros de operação e impactos no manuseio.

A terceira e a principal causa destas ocorrências, é a não observância dos procedimentos de montagem e monitoração das colunas, conforme preconizado pelo fabricante.

Em qualquer caso, quando da ocorrência de quebras e despontes, é importante fazer um diagnóstico do ocorrido, para evitar novas ocorrências.

Como este assunto é por demais extenso, ultrapassando os limites deste trabalho, são mostrados alguns exemplos selecionados apenas com o objetivo de caracterizar o procedimento.

A investigação quanto a uma eventual não conformidade do eletrodo pode ser feita pela observação da sua estrutura interna.

No caso de carbono, o ultrassom não se aplica, já que a estrutura do eletrodo dispersa o sinal.

Já a tomografia com Raios-X se mostrou altamente eficiente, revelando detalhadamente toda a estrutura interna.

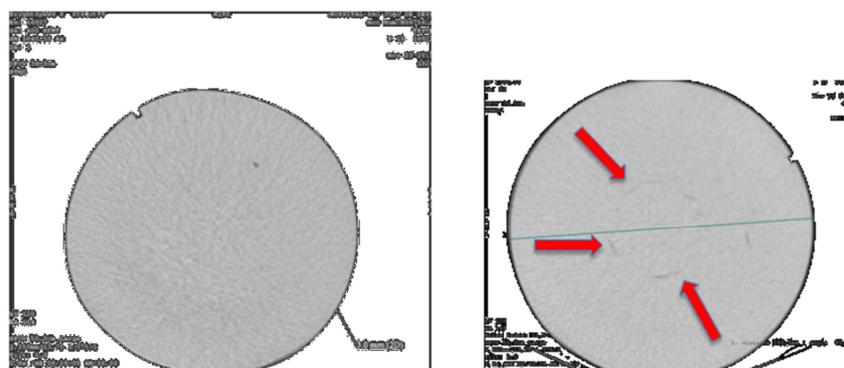


Figura 5 - Tomografia de pinos de conexão - Normal e com defeito interno

A Figura 5 mostra uma imagem assim obtida, mostrando o defeito interno de um pino de conexão (rejeitado na fábrica), comparado com um pino normal.

A título de ilustração, a causa provável do defeito do pino da esquerda foi um problema no resfriamento à saída do forno de cozimento - a contração rápida desenvolveu as trincas mostradas

As quebras de origem mecânica têm as suas origens facilmente identificáveis.

Finalmente, as quebras decorrentes de procedimentos não conformes têm várias causas, das quais foram selecionadas as que se seguem, a título de ilustração.

Para preservar confidencialidades, as fotografias dos exemplos são tiradas de trabalhos publicados em congressos.

A Figura 6 mostra dois exemplos de eletrodos com juntas inferiores abertas.



Figura 6 - Juntas abertas - desponte



Figura 7 - Quebra térmica na base do soquete

A coluna da esquerda, com a extremidade presa, mostra uma junta que estava fechada durante a operação. A separação das faces é a resultante da compressão permanente das faces e do alongamento permanente do pino de conexão. Estes esforços resultaram do excesso de força de compressão no eletrodo sobre a força de tração do pino, durante o aperto térmico.

É mostrada também o fendilhamento acima e abaixo das faces decorrentes do aquecimento excessivo do pino por efeito Joule. Isto decorreu da presença de sujeira na face (provável não observância da etapa 8 da figura 3).

A Figura 7 é um exemplo de monitoramento deficiente.

A causa foi um pino superaquecido, após uma abertura de junta. A junta estava fechada até que atingiu o meio da coluna. Por alguma razão, a coluna resfriou e a junta abriu. Quando o forno foi religado, o pino era o único condutor elétrico. Um monitoramento da coluna teria indicado a necessidade de um reaperto.

A Figura 8 mostra a quebra equatorial do pino

Uma quebra nesta área começa na altura de um a dois filetes em cada soquete. Estes são os primeiros pontos de contato entre o pino e o soquete. Os dois a quatro filetes centrais não fazem contato com o soquete. Isto é um recurso que assegura que o pino tenha uma extensão que absorva a tensão que ocorre durante o torque e o aperto térmico.

Há duas causas para este tipo de quebra.

A mais comum é uma junta aberta em qualquer altura da coluna. Como já visto, a junta aberta reduz a coluna ao diâmetro do pino, que não é suficientemente forte para a tarefa. Procedimento deficiente, referente ao item 9 da figura 3.



Figura 8 - Quebra do pino na face de contato.



Figura 9 - Quebras de pinos fora da área da face de contato.

A figura 9 mostra quebras fora da face de contato.

Ambos resultaram de danificação de filetes do soquete, causado por uma rebarba no falso nipple metálico, usado no manuseio. Não observância do item 1 da Figura 3.

O pino parou quando chegou aos pedaços dos filetes quebrados do soquete, que foram deslocados de sua posição original. O único contato entre o pino e o soquete era nos filetes na área danificada do soquete. Neste lugar o pino não era suficientemente forte para manter a junta justa. Os filetes do pino cisalharam os filetes do soquete, quando as peças separaram.

Como já mencionado há inúmeros outros casos de quebra decorrentes de não observância dos procedimentos de montagem e monitoramento, mas seria por demais extenso relacioná-los aqui.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi o de compilar alguns conceitos fundamentais, no que se refere aos eletrodos de grafite empregados em fornos elétricos a arco.

Principalmente, ele quer chamar a atenção para a importância da observância dos procedimentos de manuseio e uso destes eletrodos assim como dos critérios de seleção da classe correta, visando a otimização dos resultados técnicos e econômicos.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1 Energoprom Group. Informativo da Empresa. <http://www.energoprom.ru/en/>
- 2 Borlée J, Wauters M, Weber M. Monitoring system for controlling and reducing the electrode consumption in DC EAF plants. European Commission. Disponível em [bookshop.europa.eu/.../monitoring-system-for-contr](http://bookshop.europa.eu/.../monitoring-system-for-contr)
- 3 Fulgenzi CF. Autopsy of Electrode Breaks. AISTech 2005 Proceedings - Volume I. pgs 509-515
- 4 Fulgenzi CF. Causes and Remedies for Electrode Breaks. ISSTech 2003 Conference Proceedings. pgs 1073-1083
- 5 ACK Representantes - Informações internas